



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

MĚŘENÍ TVAROVĚ SLOŽITÝCH DÍLŮ S VYUŽITÍM ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

MEASUREMENT OF COMPLICATED SHAPE PARTS USING IMAGE PROCESSING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Sára Sujová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Studentka: **Sára Sujová**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření tvarově složitých dílů s využitím zpracování obrazu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh a popis vhodného způsobu měření tvaru ozubení pastorku převodového mechanismu akčního členu regulačního mechanismu obtokového ventilu turbodmychadla spalovacího motoru.

Cíle bakalářské práce:

Přehled akčních členů používaných při regulaci turbodmychadla spalovacích motorů. Popis řešeného problému při vyhodnocování opotřebení tvarově složitých dílů včetně návrhu řešení. Posouzení vhodnosti počítačového zpracování obrazu pro tento účel. Zhodnocení přesnosti a opakovatelnosti měření. Provedení diskuse nad získanými poznatky.

Seznam doporučené literatury:

HIERETH, Hermann a P. H. W. PRENNINGER. Charging the internal combustion engine. New York: Springer, c2007. ISBN 978-3-211-33033-3.

BOBER, William. MATLAB essentials: a first course for engineers and scientists. 1. Boca Raton: Taylor&Francis, 2018. ISBN 978-1-138-56328-5.

BLANCHET, Gerard, CHARBIT, Maurice. Digital signal and image processing using Matlab. Newport Beach, CA: ISTE, 2006. ISBN 978-1-905209-13-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá témou merania opotrebenia pastorka REA aktuátora využívaného pri regulácii systému obtokového ventilu turbodúchadla. Prvá teoretická časť práce popisuje témy obtokových ventilov, aktuátorov, ozubených kolies a optických metód. V druhej časti je realizovaná metóda merania pastorka s využitím digitálneho mikroskopu a aplikácie na meranie šírky zubov pastorka navrhutej v prostredí MATLAB.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

aktuátor, pastorok, ozubenie, opotrebenie, digitálny mikroskop, spracovanie obrazu, merací algoritmus

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with the topic of wear measurement of the pinion gear of the REA actuator used in the regulation of the turbocharger wastegate system. The first theoretical part of the thesis describes the topics of wastegates, actuators, gears and optical methods. In the second part, a pinion measurement method is implemented using a digital microscope and an application to measure the width of the pinion tooth thickness designed in the MATLAB environment.

KEYWORDS

actuator, pinion, gear tooth system, wear, digital microscope, image processing, measurement algorithm

SUJOVÁ, Sára. Měření tvarově složitých dílů s využitím zpracování obrazu. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124214>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Josef Štětina.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „*Měření tvarově složitých dílů s využitím zpracování obrazu*“ vypracovala samostatne pod vedením prof. Ing. Josefa Štětiny, Ph.D. s využitím odbornej literatúry a zdrojov uvedených v zozname, ktorý je prílohou tejto práce.

V Brne dňa 23. júna 2020

Sára Sujová

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce prof. Ing. Josefovi Štětinovi, Ph.D. za pedagogickú a odbornú pomoc pri spracovávaní tejto práce.

OBSAH

Obsah	5
1 Úvod	6
2 Obtokový ventil turbodúchadla	7
2.1 Externý obtokový ventil	7
2.2 Interný obtokový ventil	8
3 Akčné členy využívané pri regulácii turbodúchadiel spaľovacích motorov	9
3.1 Pneumatické aktuátory	9
3.2 Elektrické aktuátory	10
4 Ozubené kolesá.....	12
4.1 Kontakt ozubení	13
4.1.1 Zmeny ozubenia v časovom horizonte	14
5 Bezkontaktné meracie metódy	16
6 Popis riešeného problému.....	18
6.1 Analýza riešeného problému.....	20
6.1.1 Formulácia jednotlivých bodov riešenia.....	20
7 Výber vhodného mikroskopu	21
8 Stanovenie optimálnych podmienok vyhotovenia snímky	22
9 Návrh softwarového riešenia	23
9.1 Prostredia využívané na spracovanie obrazu	23
9.2 Vyhodnotenie možností	24
9.3 Metodika návrhu riešenia v prostredí MATLAB.....	25
9.3.1 Spracovanie zosnímaného farebného obrazu.....	25
9.3.2 Definovanie stredu pastorka	27
9.3.3 Zápis priesečníkov a výpočet ich vzdialeností	29
9.3.4 Tvorba užívateľského rozhrania	30
10 Vyhodnotenie metódy a diskusia.....	32
11 Záver.....	36

1 ÚVOD

Kvantitatívna a kvalitatívna analýza súčastí strojov je jednou z nenahraditeľných oblastí výskumu a vývoja nových technológií. V dnešnej dynamickej dobe sa kladie dôraz predovšetkým na rýchlosť, efektivitu a nízku finančnú náročnosť analýz. Z tohto hľadiska je pre prostredie vývoja priaznivé, aby sa testovanie a následné spracovanie výsledkov odohrávali na jednom mieste s čo najmenšou invazivitou a deštruktívnosťou procedúr.

V automobilovom priemysle je väčšina súčastí podrobená niekoľkofázovému „in field“ testovaniu pred uvedením do produkcie. Zároveň sú testy využívané na zbieranie čo najväčšieho množstva údajov o jednotlivých dieloch bez väčších zásahov do procesu. K naplneniu vyššie zmienených požiadaviek sú využívané bezkontaktné, konkrétne optické metódy, ktoré môžu byť automatizované.

Pri meraní tvarovo zložitých dielov sa vychádza z vlastností konkrétneho produktu, ktoré definujú rámec skúmania. Proces merania je navrhnutý na základe znalostí procesov zmeny súčastí v horizonte životnosti a požiadaviek vývojových centier.

V nasledujúcich kapitolách je vysvetlená problematika akčných členov a ich funkcie v systéme obtokového ventilu turbodúchadla. Následne je popísaná problematika ozubených kolies a ozubení, bezkontaktných metód a návrh riešenia pre meranie pastorka REA aktuátora.

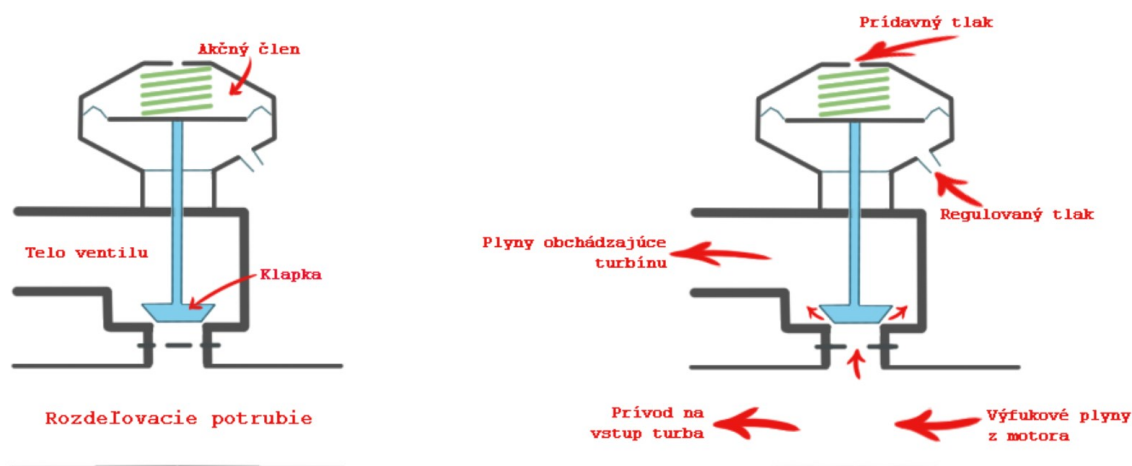
Navrhovaný spôsob riešenia merania opotrebenia pastorka by mal byť časovo a finančne úspornejší oproti meraniu pomocou CMM a manuálnemu meraniu pomocou mikroskopu. Predpokladá sa, že navrhovaná metóda bude do výsledkov zanášať menšiu chybu než manuálne meranie. Porovnaniu zmienených metód spolu s vyhodnotením vhodnosti a opakovateľnosti merania sa venuje posledná kapitola práce.

2 OBTOKOVÝ VENTIL TURBODÚCHADLA

Obtokový ventil turbodúchadla (anglicky: wastegate) je ventil, ktorý reguluje množstvo výfukových plynov prechádzajúcich lopatkami turbínového kolesa turbodúchadla, čím dochádza k regulácii rýchlosti otáčania turbíny. Obtokový ventil súčasne umožňuje časti výfukových plynov koleso obchádzať. Ventil tiež reguluje rýchlosť otáčania kompresorového kolesa, pretože kompresorové a turbínové koleso sú priamo spojené hriadeľom cez centrálnu skriňu turbodúchadla. Zároveň upravuje maximálne stlačenie vzduchu v systéme turbodúchadla, čím chráni motor aj súčasť samotnú. Obtokové ventily turbodúchadiel spaľovacích motorov sa delia na dve základné kategórie, externé a interné [1].

2.1 Externý obtokový ventil

Externý obtokový ventil (obr. 1) je úplne oddelený od turbínovej skrine, t. j. nezdieľa s ňou žiadne súčasti. Môže byť súčasťou výfukového systému. K turbodúchadlu je pripojený špeciálnym rozdeľovacím potrubím symetricky, alebo pod uhlom. Na konci potrubia je príruha upevňujúca obtokový ventil. Cez puzdro je pripojené telo ventilu vyrobené z teplovzdorných materiálov (napr. oceľ, inconel). V tele sa nachádza klapka, ktorá zabezpečuje oddelenie prostredia pred a za ňou v prípade zatvoreného ventilu. Tvar klapky definuje charakteristiku prietoku ventilom, keď je otvorený. Prietok ventilom je definovaný napr. objemom, tlakom, alebo rýchlosťou. Mimo tela ventilu sa nachádza akčný člen, ktorý riadi činnosť klapky ventilu [2].

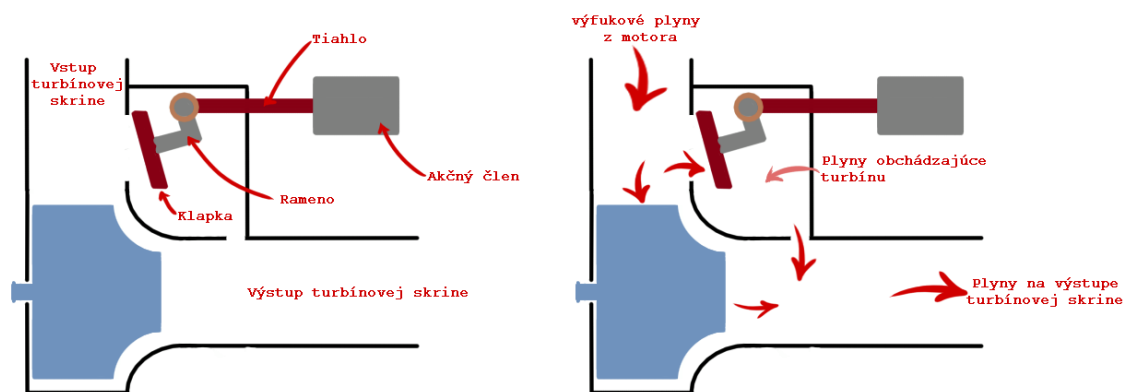


Obr. 1 Zjednodušená schéma externého obtokového ventilu, hlavné časti ventilu (vľavo), tok plynov otvoreným ventilom (vpravo) [3]

Výhodou externého obtokového ventilu je možnosť jeho montáže ako vylepšenia funkcie turbodúchadla, spravidla tam, kde nie je k dispozícii interný obtokový ventil. Vďaka silnejšej pružine aktuátoru, ktorá vydrží vyšší tlak je vhodný aj na reguláciu vysokých výkonov.

2.2 Interný obtokový ventil

Interný obtokový ventil (obr. 2) je súčasťou zostavy turbínovej skrine. Na jej vnútornej strane sa nachádza port, ktorý je súčasťou odliatku skrine, alebo je vŕtaný. Port je prikrytý klapkou na pevnom ramene. Rameno prechádza puzdrom na vonkajšiu stranu turbínovej skrine, kde je na kľuku pripevnené tiahlo spojené s akčným členom. Pneumatické akčné členy sú s tiahlom spojené väčšinou priamo, elektrické kľukovým mechanizmom. Stabilitu tiahla v zostave väčšinou zabezpečujú poistné krúžky. V prípade zatvorenej klapky výfukové plyny prúdia špirálou a cez turbínové koleso, ako v prípade skrine bez obtokového ventilu. Keď je klapka otvorená, tak časť plynov prúdi turbínou a časť ju obchádza. Časť plynov sa vracia späť za turbínovým kolesom, alebo je vypustená do atmosféry [4].



Obr. 2 Zjednodušená schéma interného obtokového ventilu, hlavné časti ventilu (vľavo), tok plynov otvoreným ventilom (vpravo)

Využitie interného obtokového ventilu, t. j. turbodúchadla so zabudovaným obtokovým ventilom, je výhodné v prípade, kedy je cena a palivová účinnosť pre koncového užívateľa dôležitejšia ako okamžitý výkon. Výhodou je tiež zachovanie výkonnosti pri značnej flexibilita uloženia v rámci zástavby motora, čiže kompaktnejší a ľahší dizajn [5].

3 AKČNÉ ČLENY VYUŽÍVANÉ PRI REGULÁCIИ TURBODÚCHADIEL SPAĽOVACÍCH MOTOROV

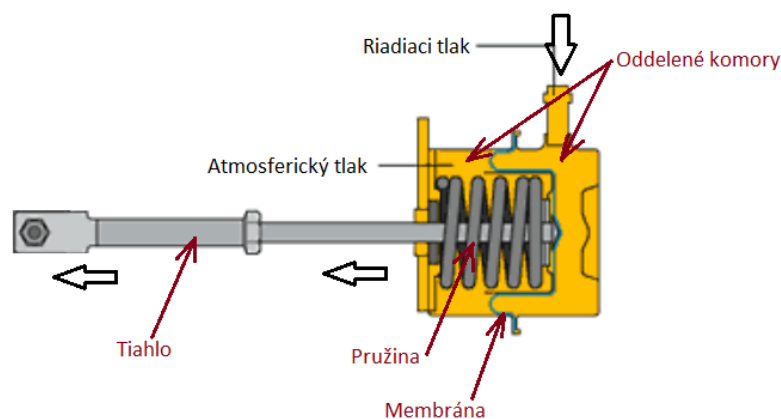
Akčné členy (aktuátory) sú využívané na ovládanie polohy klapky obtokového ventilu. Podľa princípu činnosti sú aktuátory riadiace činnosť obtokového ventilu rozdelené na

- pneumatické (pretlakové a podtlakové),
- elektrické aktuátory (REA a SREA).

3.1 Pneumatické aktuátory

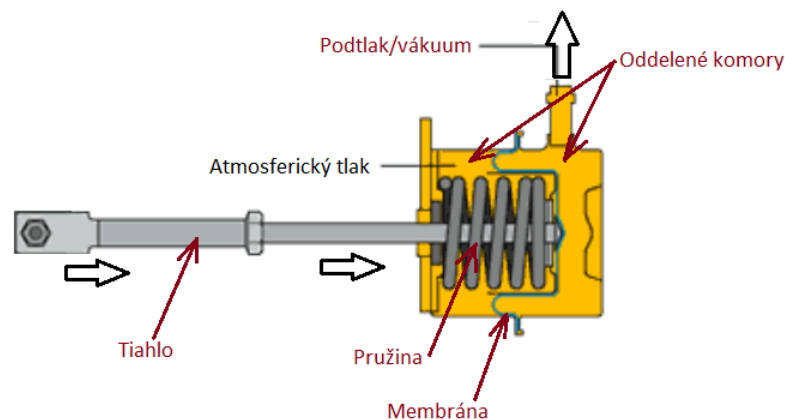
Pneumatický aktuátor ako regulačný člen obtokového ventilu je jednoduchá súčasť, ktorá s pomocou vstupného tlaku otvára obtokový ventil. Lineárny pohyb tiahla aktuátora je cez čap a rameno prenesený na rotačný pohyb klapky. Klapka riadi otváranie a zatváranie ventilu. Pneumatický aktuátor je tvorený dvoma komorami oddelenými membránou.

Pri pretlakovom aktuátore sa v jednej komore nachádza tiahlo a pružina, do druhej je privádzaný tlak. Keď je tlak na prívode väčší ako tlak od pružiny (vzniká pretlak), dôjde k stlačeniu pružiny a vysunutiu tiahla (obr. 3). Klapka sa otvorí a plyny prúdia z turbíny. Pri poklese tlaku sa zariadenie vracia do pôvodnej polohy. Klapka sa zatvorí a pružina povoľí. Nevýhodou je nevyhnutnosť použitia robustnej pružiny z dôvodu vysokého tlaku na výstupe z kompresora [6].



Obr. 3 Princíp činnosti pretlakového aktuátora [6]

Pri podtlakovom aktuátore (obr. 4) systém pracuje podobne, ako pri pretlakovom. Keď na prívode dôjde k zníženiu tlaku, v komore sa vytvorí podtlak. Podtlak prekoná silu pružiny, ktorá drží tiahlo vo vnútri komory s pružinou [6].

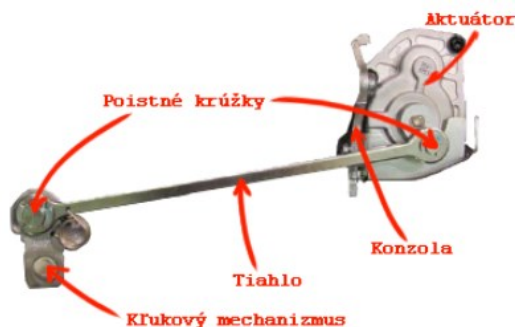


Obr. 4 Princíp činnosti podtlakového aktuátora [6]

Pri regulácii pomocou pneumatických aktuátorov všeobecne platí, že kalibrácia bodu pre povolenie pružiny pretlakom/podtlakom musí byť čo najpresnejšia. Príčinou je dosiahnutie čo najlepšieho výkonu systému preplňovania turbodúchadlom. S tým súvisí fakt, že fyzická zmena (pohyb) u pružín zaostáva za príčinou (tlak) vyvolávajúcou túto zmenu. Tento jav sa nazýva hysterézia. V opačnom prípade môže dôjsť k zníženiu účinnosti otvárania príliš nízkym tlakom, alebo k poškodeniu turbodúchadla či motora pri otváraní príliš vysokým tlakom [6].

3.2 Elektrické aktuátory

Elektrické aktuátory REA (z anglického: Rotary Electric Actuator) a SREA (z anglického: Simple Rotary Electric Actuator) sú elektricky ovládané akčné členy s rotačným mechanizmom pripojené k vonkajšej časti kinematickej zostavy interného obtokového ventilu (obr. 5). K turbodúchadlu sú pripevnené pomocou konzoly, ktorá je väčšinou súčasťou zostavy kompresorovej skrine.



Obr. 5 Vonkajšia kinematická zostava obtokového ventilu s elektrickým aktuátorom, popis hlavných častí

Na hriadeľ kefového motora je nalisovaný pastorok. Pastorok poháňa prevodový mechanizmus, ktorý pozostáva z dvoch a viac ozubených koliesok. Posledný člen prevodového mechanizmu cez kryt aktuátora prostredníctvom vonkajšej kľuky spája aktuátor s externou kinematikou [7].

Výhodami použitia elektrických aktuátorov sú krátky čas odozvy, presnosť regulácie prietoku obtokovým ventilom a poskytovanie údajov o polohe aktuátoru riadiacej jednotke motora (ECU – Engine Control Unit). V porovnaní s pneumatickými aktuátormi dosahujú elektrické aktuátory až trojnásobne rýchlejšie reakčné časy. Výhodou je aj krokové riadenie obtokových ventilov s možnosťou priameho napojenia na riadiacu jednotku. Nevýhodami sú vyššia cena a viac režimov zlyhania [7].

4 OZUBENÉ KOLESÁ

Ozubené kolesá sú súčasťou tvoriace ozubené mechanizmy. Ich funkciou je prenášanie energie a rotačného pohybu z jedného hriadeľa na druhý. Sú spojené s iným kolesom prostredníctvom krížiaceho sa ozubení. Koleso, ktoré poháňa mechanizmus sa nazýva hnacie, koleso poháňané sa nazýva hnané. Každé ozubené koleso je pripojené na os alebo hriadeľ. Hriadeľ je súčasťou, ktorá spolu s kolesom prenáša točivý moment. Koleso nasunuté na os sa točí samostatne, os je nehybná alebo nezávisle pohyblivá a neprenáša moment [8].

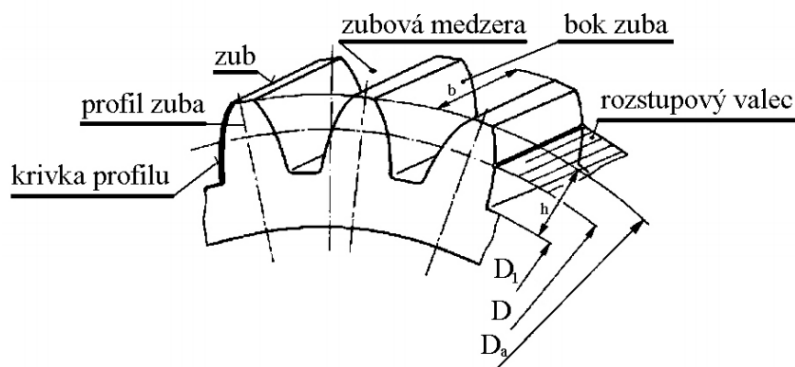
Okrem prenášania rotačného pohybu a točivého momentu sa niektoré typy ozubených kôl využívajú na zmenu smeru otáčania, kedy je podstatná vzájomná poloha hriadeľov (ôs). Podľa tejto kategórie sa ozubené súkolesia delia na

- valcový typ, kedy dochádza k vzájomnému odvaľovaniu dvoch valcovitých alebo kužeľovitých ozubených kolies,
- skrutkový typ, pre ktorý je charakteristický skrutkovitý pohyb, ktorý je zložený z pohybu odvaľovania a pohybu posuvného [9].

Podľa uloženia kolies voči sebe sú súkolesia rozdeľované na tri skupiny:

- vnútorné súkolesie je definované ako odvaľovanie menšieho kolesa po vnútornom obvode druhého (väčšieho) kolesa a smer ich otáčania je súhlasný
- vonkajšie súkolesie je definované ako vzájomné odvaľovanie dvoch kolies po ich vonkajších obvodoch, pri čom je smer ich otáčania protichodný
- súkolesie s hrebeňovým ozubením, ktoré je definované ako odvaľovanie menšieho kolesa po rovnom hrebeni, t. j. kolese s nekonečným polomerom [10].

Tvar ozubení kolies môže priaznivo aj nepriaznivo ovplyvniť vlastnosti súkolesia. Najčastejšie sa používa ozubenie s evolventným profilom. Evolventný profil je jednoduchý na výrobu a zabezpečuje stály prevodový pomer. Tento typ profilu je náchylnejší na opotrebenie a straty trením. Ďalšie typy profilov sú cykloidné, rebrové a hypoidné [10].

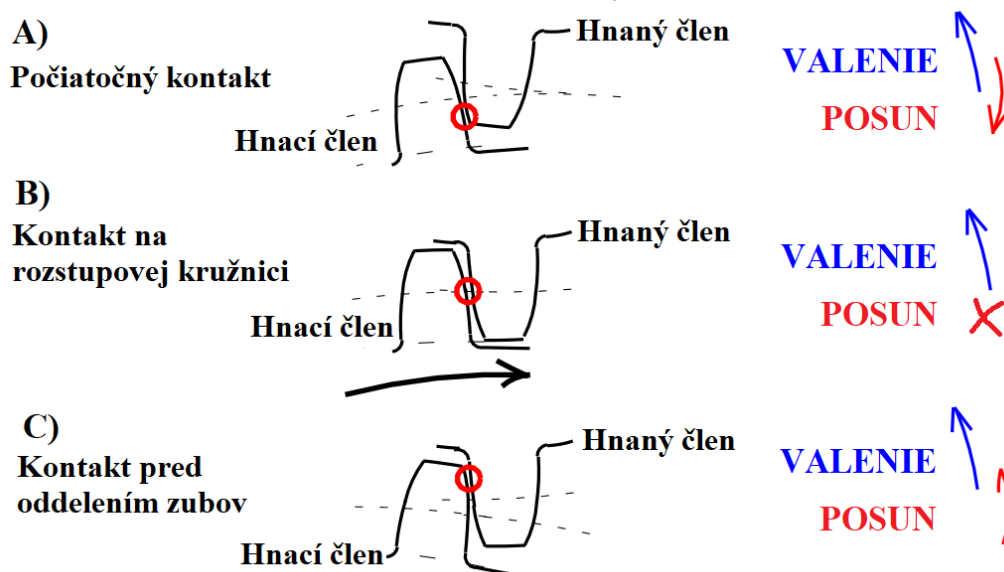


Obr. 6 Základná charakteristika ozubení [11]

Ozubenie (obr. 6) je charakterizované priemerom hlavovej kružnice D_a , pätnjej kružnice D_1 a rozstupovej kružnice D . Výška zuba h je definovaná ako rozdiel polomerov hlavovej a pätnjej kružnice. Zub je rozdelený rozstupovou kružnicou na oblasť hlavy a oblasť päty zuba. Krivka profilu je definovaná ako priesečnica čelnej roviny a bočnej roviny zuba. Hodnota b označuje šírku ozubeného venca [11].

4.1 Kontakt ozubení

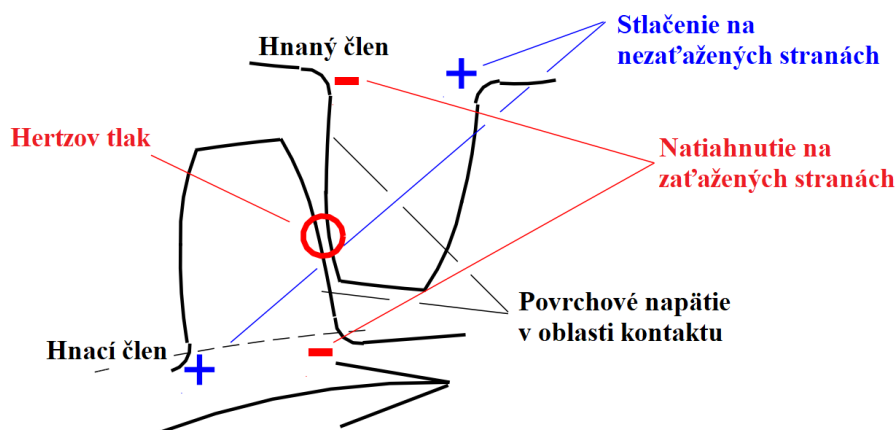
Pri vzájomnom kontakte dvoch kolies je prenášaný točivý moment. Styčnými plochami ozubených kolies sú boky zubov. Dochádza k vzájomnému valeniu a posunu zubov po sebe. Počas kontaktu dvoch zubov dochádza k relatívnej proporcionálnej zmene týchto dvoch dejov (obr. 7). Počiatok kontaktu hnacieho zuba nastáva v oblasti päty zuba. V tomto momente sa zuby po sebe posúvajú. V ďalšej fáze približovania sa k oblasti rozstupovej kružnice narastá proporcionálna časť valenia a klesá časť posunu, ich smery sú protichodné. V momente, kedy sa kontakt presunie na úroveň rozstupovej kružnice sa posun stáva zanedbateľným až nulovým. Za úrovňou rozstupovej kružnice opäť narastá proporcionálna časť posunu, avšak v súhlasnom smere so smerom valenia. Následne dôjde k oddeleniu zubov a proces sa opakuje pri nasledujúcej dvojici zubov hnaneého a hnacieho člena [12].



Obr. 7 Schéma vzájomného pohybu ozubení A) počiatkový kontakt pod úrovňou rozstupovej kružnice B) kontakt na úrovni rozstupovej kružnice C) kontakt nad úrovňou rozstupovej kružnice smerujúci k oddeleniu zubov [13]

Sily pôsobiace pri kontakte zubov spôsobujú napätie vedúce k únavovému porušeniu a poškodeniu jednotlivých zubov (obr. 8). Vzájomný posun zubov spôsobuje povrchové napätie. Pri valení zubov dochádza ku kontaktnému pnútiu, ktoré sa nazýva Hertzov tlak. Posledným napäťovým dejom je ohyb zuba, ktorý môže spôsobiť trvalú deformáciu vedúcu ku vzniku trhlin až lomu [14].

V ideálnom prípade by malo na každý zub pôsobiť konštantné napätie. Jeho pravá hodnota je časovo premenná vzhľadom k výrobným chybám, zmenám vstupného výkonu, nevyrovnanosti kolies a uloženia a vplyvu vibrácií. Charakter napätia je definovaný aj plochou kontaktu zubov. Pri menšej ploche kontaktu dochádza ku koncentrácii napätia v mieste kontaktu. Pri predikcii opotrebenia kolesa je dôležitá stredná hodnota napätia a zároveň jeho amplitúda [12].



Obr. 8 Napätie pri vzájomnom kontakte hnaného a hnacieho zuba [13]

4.1.1 Zmeny ozubenia v časovom horizonte

Podľa štandardu AGMA (Sachs, 2019) sú definované štyri typy zmien ozubenia (obr. 9):

- aktuálne opotrebenie,
- povrchová únava,
- plastické deformácie,
- vznik trhlín.

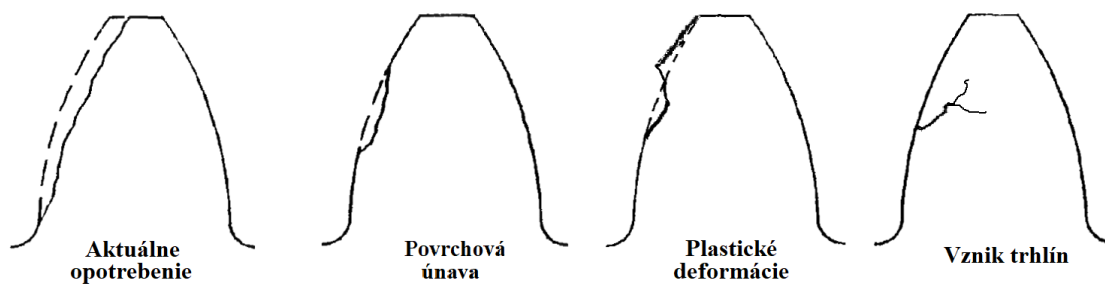
Aktuálne opotrebenie tiež nazývané aj obrusovanie dvoch povrchov je najbežnejší typ opotrebenia. Môže byť v mechanizme pozorované kontinuálne ako nános mikroskopických zrníčok odbrusovaných z povrchov ozubených kolies. Na povrchu kolesa je tento jav pozorovaný ako vyhladenie výbrusov vznikajúcich obrábaním. Zároveň dochádza ku zmene hrúbky zubov, s čím je spojená zmena krivky profilu zubov. Tento typ opotrebenia je rovnomerný po celej šírke ozubeného venca za predpokladu, že je zaťaženie celej šírky je rovnomerné spojité. Rýchlosť a vzhľad aktuálneho opotrebenia závisí od materiálov stykových plôch, drsnosti povrchov stykových plôch a ich zaťaženia [15].

Dôsledkom povrchovej únavy je odlupovanie častí povrchu (pitting a spalling). Opotrebenie spôsobuje prevažne Hertzov tlak v mieste kontaktu ozubení. S narastajúcou plochou trecieho povrchu sa miera odlupovania znižuje. Výnimkou je deštruktívna forma pittingu, kedy sú odlupované časti veľmi veľké a ich pohyb v mieste kontaktu prispieva k ďalšiemu poškodeniu ozubenia [16].

Plastické deformácie sú nevratné deformácie zubov. Počas procesu vzniku plastických deformácií je záťaž tak vysoká, že posúva materiál a tým deformuje koleso,

alebo odtlačuje obrys zubu do povrchu ozubenenia. Obidva typy plastických deformácií výrazne menia profilovú krivku ozubenenia [12].

Trhlíny väčšinou ústia do lomu zubov. Vznikajú ako následok výrobných chýb alebo únavy materiálu. Pre ozubenie bývajú lomy zubov fatálne a ozubenie sa stáva nepoužiteľným, prípadne pracuje s chybami a môže poškodiť celý mechanizmus [8].



Obr. 9 Zmeny ozubenenia [17]

5 BEZKONTAKTNÉ MERACIE METÓDY

Metódy kvantitatívneho vyhodnocovania tvarovo zložitých dielov je možné rozdeliť na dva prístupy

- kontaktný,
- bezkontaktný.

Automatizované kontaktné prístupy väčšinou využívajú súradnicové meracie stroje (CMM), ktorých technológia zabezpečuje dosiahnutie vysokej presnosti a vhodnej opakovateľnosti merania. V oblasti výskumu a vývoja sú často zvolené bezkontaktné metódy z dôvodu menšej invazívnosti merania a možnosti monitorovania priebehu opotrebovania súčastí počas testovacích procesov. Používanie bezkontaktných metód dovoľuje implementáciu kontroly kvality a odhadu životnosti priamo v procese výroby, montáže alebo vývoja bez výrazných zmien a narušovania procesov.

Kvantitatívne skúmanie tvarov môže byť absolútne alebo relatívne. Pri absolútnom meraní tvarov sú zisťované len konkrétne hodnoty jednotlivých rozmerov. Pri relatívnom porovnávaní sú konkrétne hodnoty rozmerov porovnané s referenčnými hodnotami alebo tvarom daného výrobku. Následne môže byť vyhodnotený stav produktu [18].

Metodológia bezkontaktných meracích metód zahrňuje optické metódy a iné, napr. elektrónovú mikroskopiu. Optické metódy sú podľa metódy snímania rozdelené na:

- zaznamenávanie priestorových a lokálnych vlastností rozptýleného svetla (metódy rozptylu svetla)
- zaznamenávanie priestorového rozloženia intenzity a fáz svetelných vln (interferometrické metódy)
- zaznamenávanie priestorového rozloženia svetelnej intenzity (obrazové/zobrazovacie metódy) [19].

Rozptylové metódy sa využívajú najmä na snímanie textúry povrchu. Nesnímajú jednotlivé body povrchu, ale zbierajú charakteristické údaje pre textúru danej oblasti. Princíp činnosti je založený na zákone odrazu, ktorý hovorí, že uhol odrazu je rovný uhlu dopadu, pričom odrazené vlnenie ostáva v rovine dopadu. Pri väčšej drsnosti povrchu, alebo povrchu s nerovnosťami sa lúč od povrchu odráža do viacerých smerov, čím lúč odrazený na detektor stráca na intenzite [20].

Tento systém meria rozptyl s uhlovým rozlíšením a rozptyl s integrovaným uhlom. Metódy sú integrované do kontroly kvality povrchov optických a mechanických komponentov.

Interferometrické laserové metódy sú považované za jedny z najpresnejších meracích metód. Dosahujú presnosti rádovo v zlomkoch nanometrov. Implementáciou meracích systémov je možné okrem kvantity skúmať aj kvalitatívne stránky meraných objektov. Princíp činnosti interferometrických meracích prístrojov spočíva v rozdelení laserového lúča pomocou interferometra na dva rovnobežné lúče – referenčný a meriaci. Tieto dva lúče vzájomne interferujú a dopadajú na detektor, ktorý vyhodnotí zmenu relatívnej fázy týchto lúčov [21].

Presnosť interferometrického lasera nie je presne definovaná. Závisí od vlnovej dĺžky lasera, ktorá je závislá na teplote, tlaku a relatívnej vlhkosti vzduchu spolu s indexom lomu vzduchu. Pred každým meraním je potrebné laser kalibrovat' podľa spomenutých parametrov prostredia [21].

Zobrazovacie metódy využívajú fotoelektrický jav. Optické zobrazovacie senzory konvertujú svetelné lúče (intenzitu svetla) na elektrický signál. Sú využívané dva základné typy senzorov, CCD a CMOS. Obidva typy senzorov zachytávajú fotóny dopadajúce na čip, ktorého základom je sústava kremíkových doštičiek, pixelov. Jedna zo strán takto vytvoreného polovodiča je pokrytá izolantom, na ktorej sú plošné elektródy. Druhá strana je uzemnená. V polovodiči excitujú elektróny, ktoré sú priťahované k elektródam s kladným nábojom. Kremík je v elektrickom poli, čo zabezpečí oddelenie nosičov a ich pritiahnutie k opačnej strane doštičky. Množstvo týchto nosičov stúpa priamoúmerne so svetelnou intenzitou obrazu. Následne sa uzávierka uzavrie a elektróny z pixelov sa presúvajú k výstupu [22].

Rozdiel medzi CCD a CMOS je v spôsobe zberu elektrického náboja. V CCD senzoroach je signál odvádzaný cez celý čip k okraju, kde je následne zosilnený. CMOS senzor signál z každého pixela zosilní a odvedie samostatne. Výsledný obraz u CMOS senzoru je však viac náchylný na šum a menej citlivý na svetlo. Výsledná presnosť tejto metódy sa odvíja od rozlíšenia senzora a ďalšieho softvérového spracovania obrazu [23].

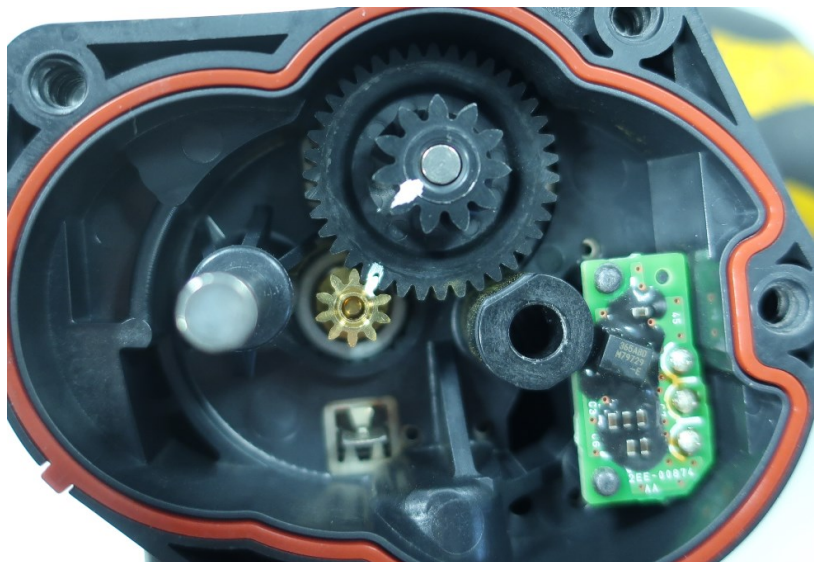
6 POPIS RIEŠENÉHO PROBLÉMU

Vplyvom vibrácií motora a turbodúchadla dochádza k časovo závislému opotrebeniu jednotlivých komponentov, vrátane aktuátorov ovládajúcich obtokový ventil. Pri aktuátoroch typu REA dochádza k opotrebeniu vonkajšieho čapu, prevodového mechanizmu vrátane pastorka a uhlíkových kief DC motora.

Pastorok ozubenia podlieha nárazovým impulzom od DC motora. Nastavenia regulácie PID (proporcionálne-integračne-derivačná spojitá regulácia), alebo skokové zmeny môžu mať za následok neplynulý chod ozubenia spôsobujúci najmä zasekávanie v krajných polohách. Uhol záberu má vplyv na opotrebenie ozubenia [10]. K najvýraznejším vonkajším vplyvom prispievajúcim k opotrebeniu pastorka patria aj vibrácie celej zostavy turbodúchadla. Vplyv vibrácií je pozorovateľný ako vyhladenie výbrusov na stykových plochách krytu prevodového mechanizmu s obalom aktuátora. Rovnako je pozorovateľný nános mikroskopických zrníčok materiálu v obale prevodového mechanizmu.

Pre posúdenie a budúce predpovedanie rýchlosti opotrebenia a režimov zlyhania aktuátora bolo doporučené informatívne monitorovanie opotrebenia a deformácie členov prevodového mechanizmu.

Pri vyhodnocovaní opotrebenia pastorka prevodového mechanizmu bol kladený dôraz na zachovanie funkčnosti REA aktuátora po opätovnom zložení a uvedení do pôvodnej podoby za účelom ďalšieho získavania dát. Kvôli tvarovej zložitosti ozubenia pastorka a obalu aktuátora (obr. 10) bol zvolený bezkontaktný optický prístup využívajúci digitálny mikroskop. Navrhovaná metóda má splniť základné predpoklady opakovateľnosti, nízkej časovej a finančnej náročnosti a nahradiť používanú manuálnu metódu, ktorá je považovaná za nedostatočne presnú.



Obr. 10: Uloženie pastorka v zostave aktuátora

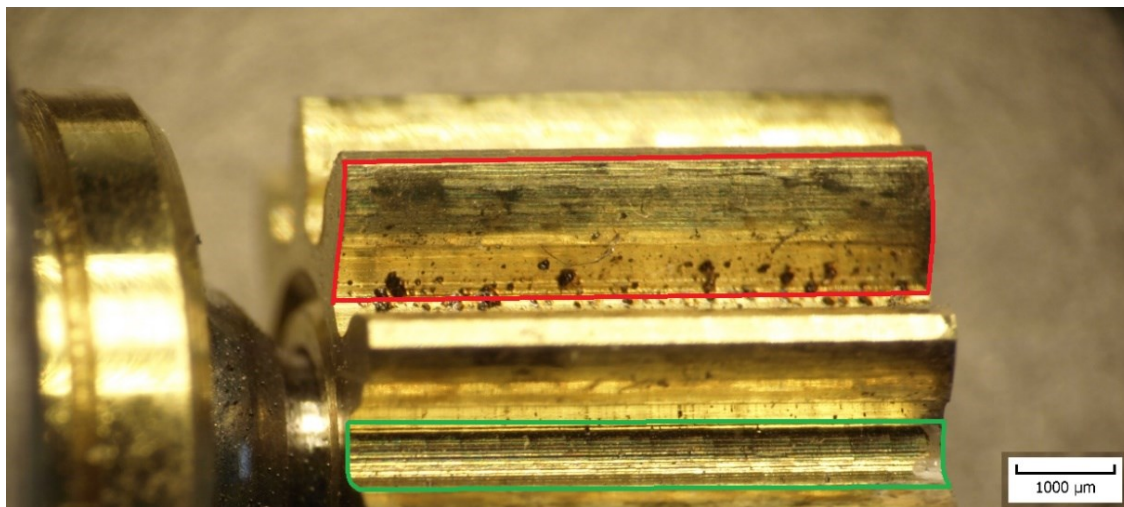
Pastorok a jeho aktuálne opotrebenie

Pastorok je súčasťou zloženého čelného súkolia s vonkajším ozubením a priamymi zubami. Je vyrobený z medenej zliatiny bizmutového bronzu. Je nalisovaný na hriadeľ kefového motora REA aktuátora. Má 10 zubov a rozmery uvedené v tab. 1.

Parameter	Rozmer [mm]
Pätná kružnica - priemer	4,862
Rozstupová kružnica - priemer	6,300
Hlavová kružnica- priemer	7,744
Šírka zuba	$1,012 \pm 0,006$
Radiálna šírka zuba	1,017

Tab. 1 Parametre pastorka uvedené výrobcom

Na zuboch pastorka bolo pozorované vyhladenie výbrusov na stykových plochách (obr. 11). Pre porovnanie je na obr. 12 priblížený detail textúry opotrebeného a neopotrebeného povrchu pastorka. Je pozorované rovnomerné opotrebenie po celej šírke ozubeného venca, čo zapríčiňuje zmenu profilovej krivky. Charakter zaťaženia v súkolesí je teda považovaný za rovnomerný spojitý. Charakteristický rozmer profilu zuba je šírka zuba meraná na rozstupovej kružnici. Táto šírka bude predmetom skúmania.



Obr. 11 Vyhladenie textúry pozorované na stykových plochách pastorka (červená oblasť) a referenčná textúra (zelená oblasť)



Obr. 12 Detail textúry v rovnakom priblížení a) na opotrebenej stykovej ploche zuba b) ploche zuba bez opotrebenia

6.1 Analýza riešeného problému

Úlohou je navrhnutie a zostavenie meracej zostavy vrátane softwarového riešenia pre meranie opotrebenia ozubenia pastorka REA aktuátora.

6.1.1 Formulácia jednotlivých bodov riešenia

- Výber vhodného mikroskopu
- Stanovenie optimálnych podmienok vyhotovenia snímky
- Softwarové riešenie
- Vyhodnotenie metódy

7 VÝBER VHODNÉHO MIKROSKOPU

Digitálne mikroskopy sú kompaktné mikroskopy bez okulárov. Ovládajú sa väčšinou programovým vybavením počítača alebo vlastnou riadiacou jednotkou. Sú využívané na dokumentáciu a meranie súčastí vo výrobe a testovaní. Majú od výroby zadefinované rozlíšenie a rozsah zväčšenia. Ovládače digitálnych mikroskopov majú zadefinované osi, mierku a zväčšenie pri vyhotovovaní každej snímky [24].

Základným kritériom pre výber vhodného spôsobu zachytávania obrazu je požadovaná presnosť merania konkrétneho dielu. So šírkou zuba pastorka v tab. 1 a jeho toleranciou $\pm 0,006$ mm je veľkosť tolerancie 0,012 mm. Počet pixelov potrebných na zachytenie obrazu s menším tolerančným rozsahom je od 84 px na milimeter vyššie. Vyššej presnosti merania je možné doceliť výberom mikroskopu s vyšším rozlíšením, alebo odmeraním každého neopotrebeného dielu pred začatím testovania. Hodnoty neopotrebeného dielu sa využívajú ako referenčné rozmery a tolerancia sa vypočíta na základe znalostí vlastností mikroskopu a vyhotoveného obrazu. Následne je možné popísať opotrebenie pastorka v stanovenom časovom horizonte.

Štandardné rozlíšenie digitálnych mikroskopov je 1,3 Mpx (1280x1024 px) a 5 Mpx (2592x1944 px). Priemer pastorka nepresahuje 8 mm. Empirickým skúmaním bolo zistené, že vďaka zložitosti obalu aktuátora, ktorý bráni priamemu prístupu ku koliesku, je možné pokryť pastorkom približne 70 % výšky a 60 % šírky zosnímaného obrazu. Bola zvolená produktová rada spoločnosti Dino-Lite Digital Microscope so zväčšením 20x ~ 50x a ovládaním cez USB rozhranie počítača. Zvolené digitálne mikroskopy využívajú CMOS senzor [25].

Pre účely porovnania presnosti je metóda testovaná na oboch rozlíšeniach mikroskopov. Vybrané modely majú označenia AM4013MT (model s rozlíšením 1,3 Mpx) a AM7013MT (model s rozlíšením 5 Mpx). Vzhľadom k údajom uvedeným v tab. 2 po prepočte na pokrytie snímača pastorkom by mal byť mikroskop s rozlíšením 5 Mpx presnejší približne o polovicu v porovnaní s 1,3 Mpx mikroskopom.

Rozlíšenie [Mpx]	Os	Smer	Rozlíšenie [px]	Pokrytie [%]	Počet pokrytých pixelov	$\mu\text{m}/1\text{px}$
1,3	x	horizontálny	1280	60	768	10,1
	y	vertikálny	1024	70	717	10,8
5	x	horizontálny	2592	60	1555	5,0
	y	vertikálny	1944	70	1361	5,7

Tab. 2 Porovnanie presnosti mikroskopov s rozlíšením 1,3 a 5 Mpx aplikáciou na rozmery pastorka

K mikroskopom Dino-Lite je voľne dostupný ovládač na zachytávanie záberov či videí, uskutočňovanie základných úprav a jednoduchých meracích úkonov s názvom DinoCapture 2.0. [25].

8 STANOVENIE OPTIMÁLNYCH PODMIENOK VYHOTOVENIA SNÍMKY

Mikroskop je pripevnený na kĺbové rameno spolu s externým prstencovitým svetelným zdrojom. Pri kalibrácii aparátu je potrebné zabezpečiť, aby nedochádzalo ku skresleniu obrazu pastorka. Čelná stena pastorka aktuátora musí byť nastavená kolmo na os prechádzajúcu objektívom mikroskopu. Prípadné naklonenie mikroskopu alebo aktuátora môže spôsobiť lichobežníkovité skreslenie, rozostrenie vzdialených častí objektu a nepresnú detekciu hrán.

Z hľadiska automatizovaného spracovania zosnímaného obrazu je vhodné, aby sa stred meranej súčasti nachádzal približne v strede obrazu. Vzdialenosť pastorka od mikroskopu je nastavená na konkrétnu hodnotu.

Stabilitu svetelných podmienok zabezpečuje externý prstencovitý svetelný zdroj. Svetlo zo zdroja je usmernené tak, aby boli dobre viditeľné hrany pastorka a nedochádzalo k presvetleniu obrazu. Integrovaný svetelný zdroj kamery nie je v prevádzke, pretože sústreďuje svetelné lúče do malej oblasti a nie je možné vhodne korigovať intenzitu jeho žiarenia.

Pre zvýšenie detekovateľnosti skúmaných hrán je vhodná separácia pastorka od okolia zavedením cudzieho predmetu (tmavá fólia) medzi pastorka a hriadeľ motora, prípadne odtienenie pozadia v okolí pastorka pomocou predmetu s výrezom. Ďalšou možnosťou je zavedenie antireflexnej vrstvy na pozadie. Tento postup sa neodporúča, pretože môže mať vplyv na ďalší chod aktuátora.

9 NÁVRH SOFTWAREVÉHO RIEŠENIA

9.1 Prostredia využívané na spracovanie obrazu

Spracovanie obrazu v prostredí C/C++

V programovacom jazyku C/C++ sa v dnešnej dobe využíva na spracovanie obrazu prevažne knižnica *OpenCV*, ktorá obsahuje množstvo optimalizovaných funkcií a nástrojov. Jazyk je kompatibilný s väčšinou dostupných platforiem [26].

Syntax jazyka C/C++ je pomerne zložitá a spôsobuje komplikácie pri vytváraní vizualizácií a ladení kódu obzvlášť pri implementovaní nových algoritmov. Dokumentácia je stručná, v niektorých prípadoch nedostačujúca alebo nepresná.

Spracovanie obrazu v prostredí Java

Pre programovací jazyk Java existuje rozšírenie *Java Advanced Imaging (JAI)*, ktoré podporuje spracovanie obrazu vo viacrozmernom priestore. Rovnako ako Java, JAI je objektovo orientovaný, takže obrazy a operácie vykonané s obrazom sú definované ako objekty. Java je tiež kompatibilná s *OpenCV* knižnicou [27].

Tento jazyk je známy hlavne kompatibilitou so všetkými platformami, na ktorých je schopný fungovať bez predošlej kompilácie. Jazyk Java má isté podobnosti v syntaxi s programovacím jazykom C. Zároveň je jednoduchší na používanie a ladenie kódu ale pomalší vo výpočtoch [27].

V programovacom jazyku Java je vyvinutý program *ImageJ*. Je používaný na úpravu a analýzu obrazu a je modifikovateľný tvorbou makier.

Spracovanie obrazu v prostredí Python

Programovací jazyk Python má pri svojej všestrannosti radu balíčkov funkcií, ktoré je možné použiť na výpočty a analýzu obrazu, napr. *NumPy* na spracovanie mnohorozmerných objektov, ktorý povoľuje maticový zápis. Ďalej dovoľuje využívať knižnicu *OpenCV* alebo jednoduchý *scikit-image*. Jazyk sa vyznačuje hlavne jednoduchým použitím a prehľadnosťou syntaxe. [28]

Pri programovaní je možné využiť knižnicu *matplotlib* na vytváranie interaktívnych vizualizácií.

K niektorým funkciám neexistuje dokumentácia. Je dostupné malé množstvo návodov a ukážok kódu. Ďalšou nevýhodou je, že má oproti iným programovacím jazykom pomerne dlhé časy zložitých výpočtov a menej optimalizačných nástrojov.

Spracovanie obrazu v prostredí MATLAB

Programovací jazyk MATLAB je vyvinutý predovšetkým na vykonávanie technických výpočtov a analýz. Komunitu užívateľov tvoria prevažne vedeckí pracovníci. Má implementovanú výkonnú maticovú knižnicu, ktorá je pre výpočty v oblasti lineárnej algebry dobre optimalizovaná. V oblasti maticových výpočtov je MATLAB efektívnejší ako ostatné programovacie jazyky [29].

Všetky úkony vrátane vizualizácie výsledkov a ladenia zdrojového kódu sa odohrávajú v jednom prostredí súčasne, čo robí programovanie efektívne a prehľadné. Zároveň syntax jednotlivých funkcií je v porovnaní s inými jazykmi prehľadnejšia a kratšia. Všetky uložené premenné sú viditeľné v rámci užívateľského rozhrania. Pre lepšiu optimalizáciu kódu sú dostupné sady nástrojov (toolboxy). Na spracovanie obrazu je využívaný *image processing toolbox*, ktorý má predprogramované množstvo funkcií využívaných práve na prácu s obrazom [29].

Používateľom MATLABu je z programovacieho prostredia prístupná podrobná dokumentácia. Zároveň je voľne dostupná na webe.

Nevýhodou je iná syntax ako vo väčšine programovacích jazykov. Maticové výpočty môžu spôsobovať dlhšie výpočtové časy v nematicových operáciách.

9.2 Vyhodnotenie možností

Väčšina programovacích jazykov obsahuje dostupné nástroje na riešenie úloh spracovania a analýzy obrazových dát. Výber vhodného programovacieho jazyka a prostredia vždy závisí na charaktere a náročnosti úlohy z vizuálneho a výpočtového hľadiska.

Prostredie MATLAB obsahuje veľké množstvo dostupných funkcií. Jednoduchá orientácia v kóde a prostredí je silnou stránkou jazyka obzvlášť pri grafických úlohách. Pri zložitejších operáciách, napr. s videami, je jeho efektivita často nedostačujúca.

Ostatné programovacie jazyky sú rýchlejšie vo výpočtoch a zároveň menej náročné na operačnú pamäť. Pre nového užívateľa je zložitejšie na začiatok vybrať a uviesť do chodu všetky potrebné rozšírenia. V porovnaní s MATLABom sú úkony ako ladenie kódu alebo tvorba vizualizácií zložitejšie, rovnako ako syntax jednotlivých jazykov a matematických operácií v nich [30].

Prostredie MATLABu je vhodné pre vytváranie nových funkcií a algoritmov. Následne je možné algoritmus implementovať do iného programovacieho jazyka.

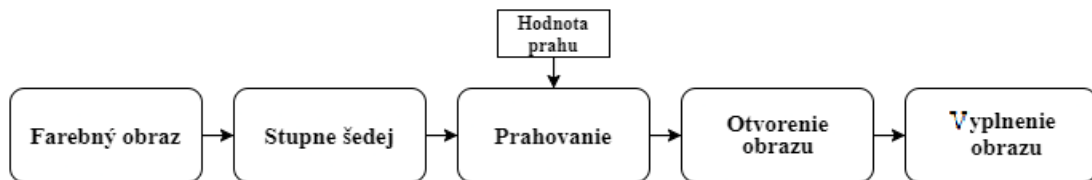
9.3 Metodika návrhu riešenia v prostredí MATLAB

Návrh riešenia analýzy obrazu pastorka pozostáva z nasledujúcich okruhov

- Spracovanie zosnímaného farebného obrazu
- Definovanie stredu pastorka
- Zápis priesečníkov a výpočet ich vzdialeností
- Tvorba užívateľského rozhrania

9.3.1 Spracovanie zosnímaného farebného obrazu

Vstupom do programu na meranie pastorka je farebný obraz zosnímaný pomocou digitálneho mikroskopu.



Obr. 13 Spracovanie farebného obrazu [31]

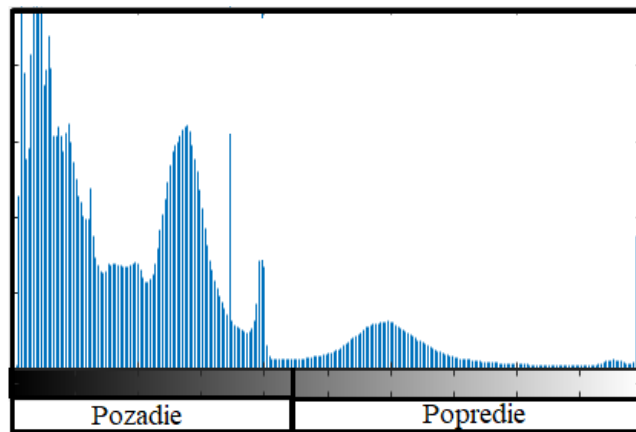
Obraz je modifikovaný pomocou príkazu *rgb2gray* Image Processing Toolboxu programu MATLAB. Princípom funkcie je zachovanie informácie o svetlosti. Zároveň odstraňuje odtieň a sýtosť farieb. Obrázok má po prevedení súradnice hodnoty odtieňa a sýtosti nastavené na nulu. Výstupom je obraz v stupňoch šedej označený $f(x,y)$ [32].

V ďalšom kroku je vykonaná segmentácia obrazu $f(x,y)$ globálnym prahovaním podľa vzorca:

$$g(x,y) = \begin{cases} 0, & f(x,y) \leq P \\ 255, & f(x,y) > P \end{cases} \quad (1)$$

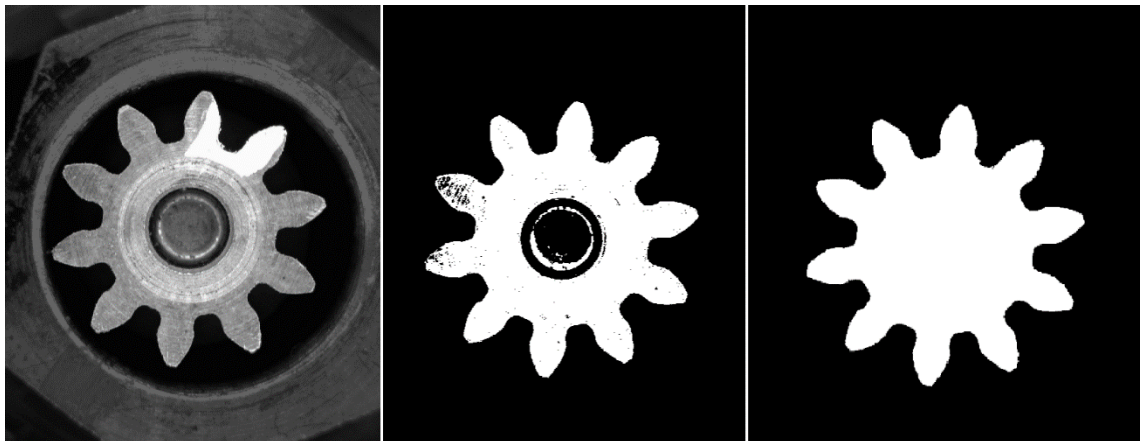
V tejto metóde vystupuje jediný parameter - hodnota prahu P . Znamená to, že všetky pixely v obraze tmavšie než prahová hodnota sa prefarbia na čierne a pixely svetlejšie než prahová hodnota sa prefarbia na bielo. Výsledkom je oddelenie popredia od pozadia, t. j. vykreslenie hrán objektu (obr. 15). Obraz je binárny [33].

Hodnota prahu je zvolená s pomocou histogramu jasu obrazu. Tento typ histogramu vykresľuje počet pixelov pre každú úroveň jasu v obraze. V obraze pastorka je výrazne odlišená intenzita popredia od pozadia (obr. 14). Lokálne minimum nachádzajúce sa medzi hodnotami popredia a pozadia určuje hodnotu prahu P .



Obr. 14 Histogram jasu obrazu

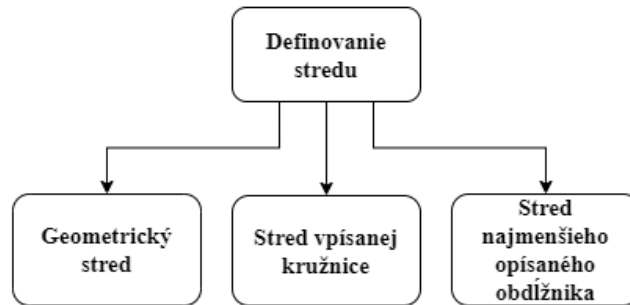
Následne sú z obrazu odstránené malé farebné škvrny, ktoré vznikli prahovaním. Táto morfológická operácia sa nazýva otvorenie obrazu (area opening). Používa sa na vyhladenie obrazu, pričom tvar objektu zostáva pôvodný a neporušený. Neohraničené a nedefinované prvky sa ďalej odstránia pomocou funkcie *imfill* (obr. 15) [34].



Obr. 15 Výsledok úprav farebného obrazu pastorka: obraz v stupňoch šedej (vľavo), obraz po segmentácii (v strede) a výsledný obraz pripravený na meranie (vpravo)

9.3.2 Definovanie stredu pastorka

Na definovanie stredu telesa je využívaných niekoľko metód, ktoré môžu potenciálne slúžiť na zakreslenie stredu pastorka. V tejto kapitole sú popísané tri metódy, porovnanie ich výsledkov a potenciálnych nepresností, ktoré môžu zaniest chybu do následného merania.



Obr. 16 Metódy definovania stredu

Prvou metódou je zisťovanie súradníc centroidu. Geometrický stred (centroid) objektu je definovaný ako aritmetický priemer polôh všetkých bodov objektu. V MATLABe je možné využiť funkciu *regionprops* na zapísanie údajov o dĺžkach ôs a súradniciach bodov. Z týchto údajov sa vypočítajú súradnice centroidu. Táto metóda berie do úvahy úbytok hmoty (plochy) pastorka. Nerovnomerný úbytok hmoty spôsobuje vychýlenie geometrického stredu [35].

Druhou metódou je využitie hranice objektu. Po prevedení obrazu na binárny vznikne jasne definovaný obrys objektu. Obrys je využitý na vykreslenie a zadenovanie hrany objektu so šírkou 1px [36]. Hrana objektu slúži ďalej na vykreslenie najväčšej vpísanej kružnice telesa. Po pripočítaní hodnoty jedného pixelu k jej polomeru vznikne rozmer pätnjej kružnice. Vychádzajúc z teórie opotrebenia vysvetlenej v kapitole 4.1 sa predpokladá, že opotrebenie zubov pastorka nespôsobuje zmenu pätnjej kružnice. Stred tejto kružnice je teda stredom pastorka a polomer pätnjej kružnice je o 1 px väčší než polomer vpísanej kružnice. Nevýhodou tejto metódy je možné skreslenie pri vyhotovovaní snímky, ktoré vnáša do stanovovania stredu chybu.

Tretia metóda je tiež obmedzená správnym vyhotovením snímky. Jedná sa o metódu získania súradníc vrcholov najmenšieho obdĺžnika opisujúceho útvar. V priesečníku uhlopriečok a zároveň stredov strán tohto obdĺžnika sa nachádza stred tohto obdĺžnika. Táto metóda je náchylná na nepresnosti vznikajúce väčším opotrebením zubov zahrňujúce zníženie hlavovej časti zuba, čo sa následne premietne do zmenšenia obdĺžnika. Stred pastorka takto nebude určený s dostatočnou presnosťou a metóda teda nie je spoľahlivá.

Metódy boli porovnané v praxi a výsledky sú zapísané v tab. 3. Ako referencia bol použitý pastorok bez opotrebenia. Hodnoty súradníc stredu referenčného pastorka podľa všetkých troch metód boli zhodné až na jeden rozmer určený metódou geometrického stredu. Nasledujúce pastorky mali istú mieru opotrebenia. Hodnoty stredov pre tieto pastorky sa líšia, s narastajúcou mierou opotrebenia sú hodnoty

rozdielnejšie. Za predpokladu, že výpočet podľa metódy najväčšej vpísanej kružnice nie je závislý na opotrebení ozubenia boli overené nasledujúce predpoklady:

- Pri použití metódy geometrického stredu vzniká chyba merania s úbytkom materiálu.
- Pri použití metódy najmenšieho opísaného obdĺžnika vzniká najväčšia chyba pri znížení hlavovej časti zuba spôsobenej odlomením.

Pre ďalšie spracovanie obrazu bola vybraná metóda najväčšej vpísanej kružnice. Ostatné dve metódy nie sú na monitorovanie zmien ozubenia vhodné.

Pastorok	Vizuálne vyhodnotenie pastorka	Súradnica stredu	Súradnice podľa metódy najväčšej vpísanej kružnice	Súradnice podľa metódy geometrického stredu	Súradnice podľa metódy najmenšieho opísaného obdĺžnika
1	bez opotrebenia	X	1108 px	<u>1107 px</u>	1108 px
		Y	1067 px	1067 px	1067 px
2	minimálne opotrebenie	X	1104 px	1104 px	1104 px
		Y	1047 px	<u>1044 px</u>	1046 px
3	odlomená časť zuba	X	1111 px	1100 px	<u>1082 px</u>
		Y	1072 px	1073 px	<u>1055 px</u>
4	veľká miera opotrebenia	X	1230 px	<u>1198 px</u>	1227 px
		Y	1056 px	1057 px	<u>1064 px</u>
5	veľká miera opotrebenia	X	1122 px	<u>1154 px</u>	1118 px
		Y	1093 px	<u>1081 px</u>	1090 px

Tab. 3 Porovnanie metód na zisťovanie súradníc stredu pastorka; najväčšia deviácia rozmerov stredu každého pastorka je podčiarknutá

Metóda najväčšej vpísanej kružnice spĺňa tvrdenie: stred kružnice je najvzdialenejší od ktoréhokoľvek hraničného bodu objektu a zároveň leží v strede objektu (Birdal, 2020). Vychádzajúc z tohto predpokladu a tvrdenia, že je zadefinovaná hranica objektu, metóda pozostáva z dvoch krokov [37]:

- zadefinovanie bodov vo vnútri objektu
- hľadanie bodu, ktorý je najvzdialenejší od najbližšej hrany.

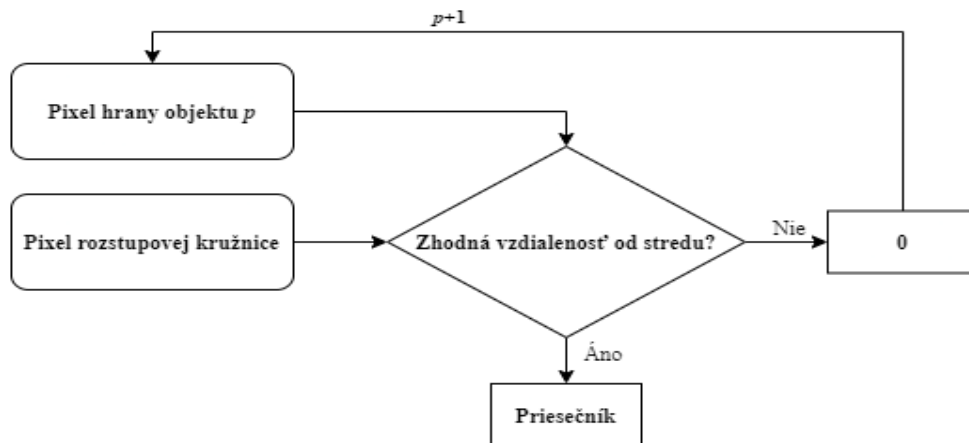
K dosiahnutiu vyššie uvedeného je využitá Euklidovská transformácia vzdialeností binárneho obrazu. Každému pixelu v obraze je priradené číslo symbolizujúce vzdialenosť od najbližšieho nenulového pixelu za predpokladu, že čiernym pixelom je priradená hodnota 1 a bielym pixelom hodnota 0 [38].

Pre zadefinovanie bodov vo vnútri uzavretého polygonálneho útvaru je v MATLABe používaná funkcia *inpolygon*. Funkcia označí body, ktoré sa nachádzajú v útvaru alebo na jeho hranici. Jej jednoduchosť je nevýhodou pri veľkom rozlíšení obrázkov, pretože funkcia prechádza zaradom všetky definované body a porovnáva ich s hraničnými bodmi. Výpočet je neefektívny a časovo náročný. Zefektívnením funkcie sa zaoberá Darren Engwirda (2020), ktorý niekoľkonásobne znížil výpočtový čas pre vysoké rozlíšenia obrázkov [39].

9.3.3 Zápis priesečníkov a výpočet ich vzdialeností

Základným krokom je vykreslenie a zadefinovanie hlavovej, rozstupovej a pätnjej kružnice na základe znalostí stredu pastorka, rozmerov pastorka deklarovaných výrobcom v tab. 1 a rozmeru vpísanej kružnice v pixeloch.

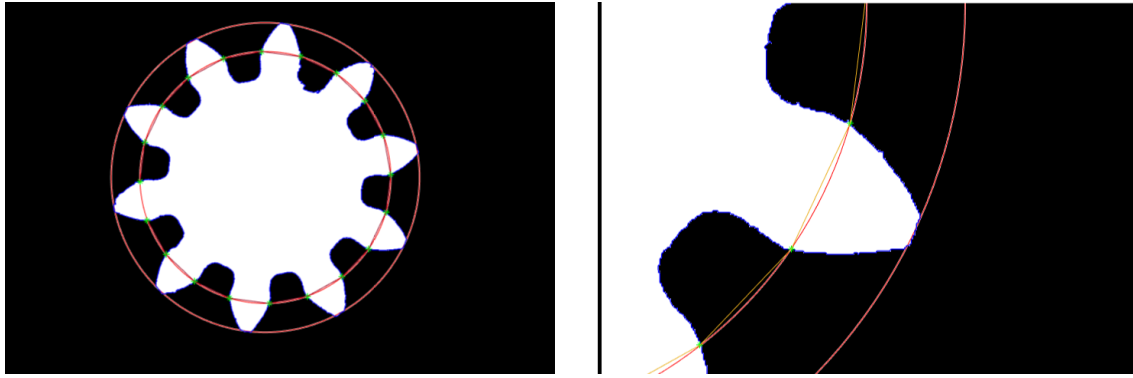
Údaje každého pixelu hrany objektu so šírkou 1px zadefinovanej v kapitole 9.3.2 sú zapísané v matici *boundary*



Obr. 17 Definovanie priesečníkov

Každý pixel z matice *boundary* má definovanú vzdialenosť od stredu pastorka. Táto hodnota je porovnaná s hodnotou polomeru rozstupovej kružnice. V prípade, že sú zmienené dve hodnoty zhodné, program vyhodnotí pixel ako priesečník kružnice a priradí mu logickú hodnotu 1. V prípade, že pixel nie je priesečníkom, program mu priradí logickú hodnotu 0. Výsledkom je nová matica priesečníkov obsahujúca body, ktorým bola priradená logická 1. Súradnice priesečníkov sú následne prevedené z kartézskych do polárnych.

Do výpočtu konečného počtu priesečníkov vstupuje hodnota počtu zubov pastorka. Na každý zub pripadajú dva priesečníky. Každý priesečník sa nachádza v podoblasti s malou toleranciou. Všetky priesečníky, ktoré sa nachádzajú v jednej podoblasti sú zoskupené do výsledného priesečníka s novými definovanými súradnicami.



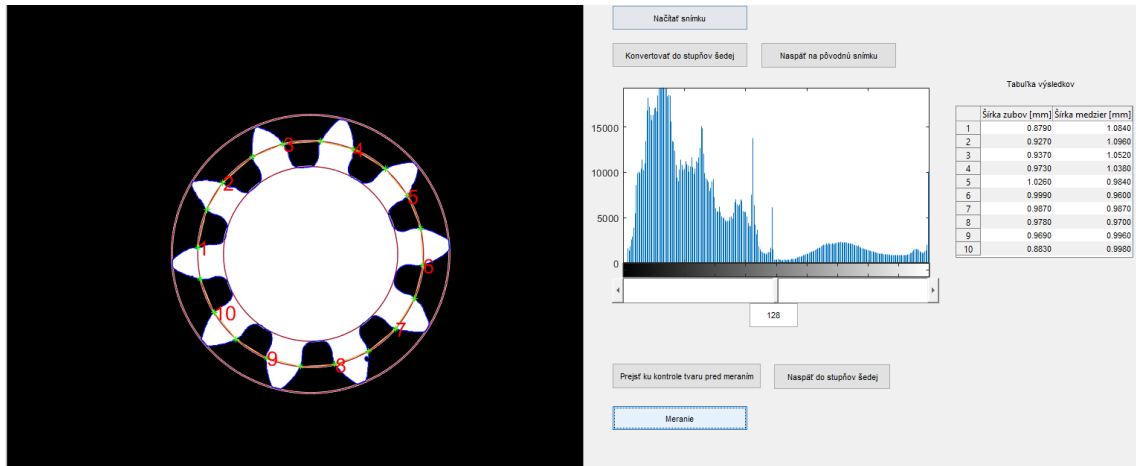
Obr. 18 Vykreslené priesečníky a detail priesečníkov

V poslednom kroku sú vypočítané vzdialenosti každých dvoch po sebe nasledujúcich priesečníkov. Priesečníky sú následne zakreslené do obrázka (obr. 18) a výsledné vzdialenosti sú zobrazené v tabuľke.

9.3.4 Tvorba užívateľského rozhrania

Cieľom tvorby užívateľského rozhrania je zjednodušiť koncovému užívateľovi prácu s kódom. Rozhranie slúži na ovplyvňovanie a zadávanie hodnôt vstupných parametrov, zároveň môže slúžiť na úpravu a kontrolu výsledkov. V prostredí MATLAB je možné využiť GUIDE alebo novšiu verziu App Designer. V oboch prípadoch ide o prostredie, ktoré umožňuje tvorbu rozhrania pomocou priradovania funkcií jednotlivým vizuálnym komponentom (tlačidlá, interaktívne okná, atď.). Ďalšou možnosťou tvorby rozhrania je manuálne programovanie [40].

V prípade tvorby užívateľského rozhrania pre aplikáciu merania pastorkov (obr. 19) je potrebné do programu načítať snímky pastorka a zvoliť hodnotu prahu P kvôli využívaniu globálneho prahovania. Po vybraní snímky je obraz modifikovaný do stupňov šedej a následne je v prostredí vykreslený histogram. Jeho krivka uľahčuje voľbu správneho bodu P a obraz je prevedený na binárny a ďalej modifikovaný. Pre kontrolu správnosti postupu sa v UI nachádza okno graficky znázorňujúce jednotlivé úkony. Zároveň je možné vrátiť snímku do pôvodnej podoby po vykonaní každej funkcie. Kvôli ďalšiemu spracovaniu nameraných dát sú výsledky merania zobrazené v tabuľke. V zmysle správneho čítania výsledkov je každej medzere a zubu priradené číslo. Toto číslo sa nachádza v obraze pastorka vždy pri začiatočnom bode medzery. Čítanie výsledkov prebieha v smere hodinových ručičiek.



Obr. 19 Uživatelské rozhranie aplikácie, náhľad snímky (vľavo) a ovládacie prvky vrátane tabuľky výsledkov (vpravo)

Aplikácia je podľa požiadaviek navrhnutá jednoúčelovo, t. j. na meranie pastorkov s konkrétnymi rozmermi a konkrétnym počtom zubov. Do výpočtu môže byť zaradených viac premenných, ktoré sú v zmysle optimalizácie merania konkrétnej súčasti nastavené na konštantné hodnoty. Rozšírením užívateľského rozhrania o tieto premenné by bolo možné rozšíriť aplikáciu na meranie ozubení vo všeobecnej rovine.

10 VYHODNOTENIE METÓDY A DISKUSIA

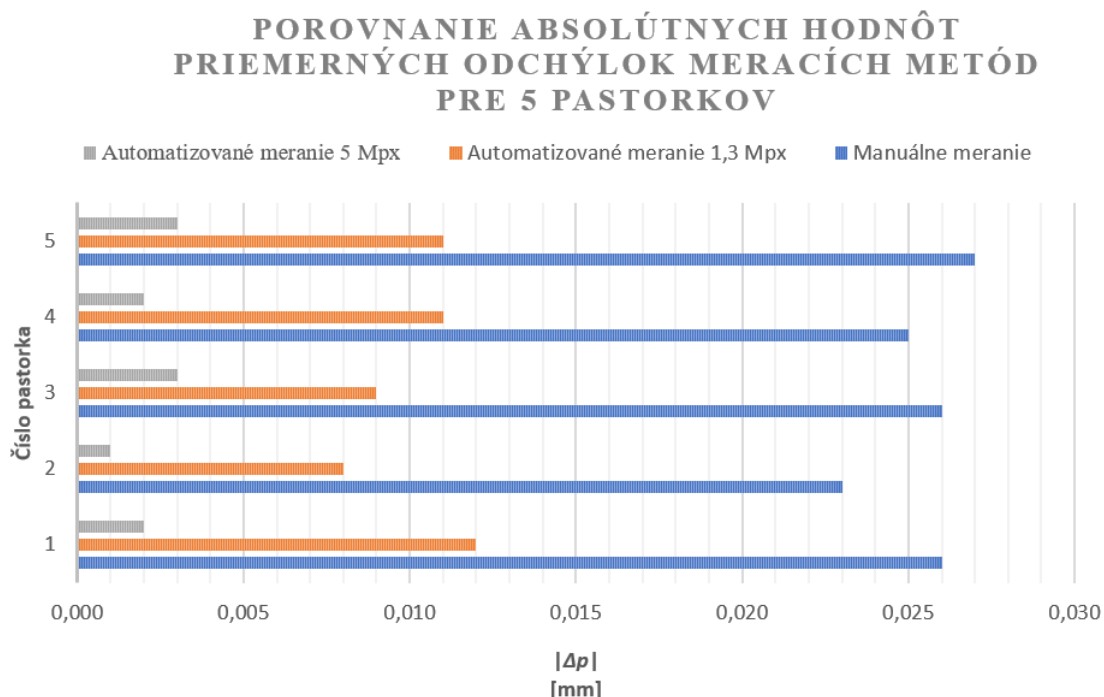
Na základe metódy popísanej v predchádzajúcich kapitolách bolo vyhotovených a následne vyhodnotených niekoľko obrazov pastorka. Rozmery pastorka na týchto obrazoch boli ďalej vyhotovené manuálne a kontaktnou metódou pomocou stroja CMM. Metóda CMM s rozlíšením 1 μm a presnosťou 0,5 μm bola zvolená za referenčnú metódu merania, pretože je u nej predpokladaná najvyššia presnosť.

Výsledky navrhovanej automatizovanej optickej metódy s dvoma rôznymi rozlíšeniami mikroskopov a manuálnej optickej metódy boli porovnané s CMM meraním. Na základe tohto porovnania bola pre každý zub stanovená odchýlka Δ od referenčnej hodnoty. Po porovnaní jednotlivých odchýlok Δ boli stanovené maximálne hodnoty odchýlok Δ_{max} a priemerné odchýlky pre každý pastorok Δ_p zobrazené v tab. 4 a obr. 20. Z výsledkov je možné pozorovať nasledujúce:

- Pri manuálnom meraní pomocou mikroskopu s rozlíšením 1,3 Mpx dosahujú odchýlky od referenčnej metódy najvyššie priemerné hodnoty. Všetky hodnoty získané manuálnym meraním sú vyššie ako referenčné hodnoty. Najväčšia hodnota odchýlky je 56 μm .
- Pri automatizovanom meraní pomocou mikroskopu s rozlíšením 1,3 Mpx je pozorované výrazné zmenšenie odchýlok oproti manuálnemu meraniu. Hodnoty získané automatizovaným meraním sú nižšie ako referenčné hodnoty. Najväčšia hodnota odchýlky je 14 μm .
- Automatizované meranie pomocou mikroskopu s rozlíšením 5 Mpx vychádza z porovnania ako najpresnejšia metóda. Najväčšie hodnoty odchýlky nepresahujú 5 μm .

Číslo pastorka	Veličina	Manuálne meranie 1,3 Mpx [mm]	Automatizované meranie	
			1,3 Mpx [mm]	5 Mpx [mm]
1	Δ_p	-0,026	0,006	0,002
	Δ_{max}	-0,056	0,009	0,004
2	Δ_p	-0,023	0,009	-0,001
	Δ_{max}	-0,050	0,012	-0,005
3	Δ_p	-0,026	0,006	-0,003
	Δ_{max}	-0,048	0,011	-0,004
4	Δ_p	-0,025	0,006	0,002
	Δ_{max}	-0,042	0,009	0,003
5	Δ_p	-0,027	0,008	0,003
	Δ_{max}	-0,040	0,014	0,004

Tab. 4 Výsledky porovnania odchýlok jednotlivých meracích metód



Obr. 20 Porovnanie odchýlok meracích metód

Hlavné faktory zapríčiňujúce odlišnosť výsledkov sú chyby ľudského oka a odlišnosť použitých senzorov.

Pri manuálnej metóde sa pozorovateľ vo veľkej miere podieľa na konečnom výsledku. Aj pri ideálnom nastavení, použití pomocných mriežok v softvéroch na spracovanie obrazu a lupy pre priblíženie hrán objektov, je náročné jednoznačne a opakovateľne definovať hranu objektu. V dôsledku tohto vplyvu vznikajú náhodné chyby, ktoré nie je možné odstrániť a zároveň nie je možné jednoznačne určiť ich hodnotu. Tento vplyv je pri použití automatizovanej metódy minimalizovaný vhodnou elimináciou rušivých vplyvov pozadia a prevedením obrazu na binárny pomocou krokov opísaných v kapitole 9.3.1.

Použité senzory boli odlišné v rozlíšení, teda v počte bodov (pixelov) na plochu snímača. Jedná sa o dve rozlíšenia digitálnych mikroskopov, ktoré sú bežne dostupné na trhu. Rozdiel je v počte mikrometrov snímaného objektu na pixel vo vertikálnom aj horizontálnom smere (tab. 2 v kapitole 7). Tento rozdiel je porovnateľný aj v diagonálnych smeroch na obraze, pretože pixely tvoria štvorcovú sieť. Jednotlivé rozmery sa riadia pravidlami geometrie. Znamená to, že podľa Pythagorovej vety je výsledná diagonála dlhšia ako každá zo strán štvorca. Dôsledkom je teda väčšia chyba v diagonálnych smeroch. Tento trend je pozorovateľný aj vo výsledkoch merania. Je možné konštatovať, že väčšie rozlíšenie snímača má za následok upresnenie meracej metódy vo vertikálnom, horizontálnom aj diagonálnom smere [41].

V tab. 2 v kapitole 7 je stanovený rozmer v μm na jeden pixel snímača. Je teda predpokladom, že stanovené nepresnosti budú v rozmedzí polovice tohto rozmeru, prípadne polovice dĺžky diagonály pixelového štvorca. Z výsledkov uvedených v tab. 4 vyplynulo, že tieto odchýlky sú oproti predpokladu o niekoľko μm vyššie. Tento rozdiel spôsobuje citlivosť snímača a následné spracovanie obrazu. Softvér dokáže pracovať len na pixelovej úrovni, nedokáže rozlíšiť hodnoty pod rozlíšením snímky. Zároveň technológia zachytávania obrazu CMOS senzorom pripúšťa výskyt šumu, čo môže spôsobovať skreslenie vo výpočtoch. Interval odchýlok od metódy CMM nebol pri meraní rovnomerný v oboch smeroch. Pri metóde s použitým 1,3 Mpx senzorom bol odmeraný interval odchýlok rýdzo jednosmerný.

Metóda je navrhnutá tak, aby boli obmedzené vstupy do procesu merania na minimum. Zároveň má stanovené stabilné podmienky pre vyhotovenie snímky. Pri dodržaní týchto podmienok je voľba softwarových parametrov jednoznačná. Tieto faktory zabezpečujú vysokú mieru spoľahlivosti a opakovateľnosti merania.

Po finančnej stránke je zakúpenie digitálneho mikroskopu jednorázová investícia. Digitálne mikroskopy nevyžadujú špeciálnu údržbu. Cena digitálnych mikroskopov sa odvíja od požiadavky na rozlíšenie senzora a rady prídavných funkcií a v porovnaní s CMM strojmi je niekoľkonásobne nižšia. Konkrétne dva modely použité na demonštráciu riešenia sú uvedené v tab. 5, kde je zároveň uvedená ich predajná cena k 06/2020 a popis modelov, ktorý je dostupný na stránkach predajcu. Na vyhotovenie snímky je možné použiť aj iný model alebo značku digitálneho mikroskopu. Pri výbere iného mikroskopu je vhodné použiť mikroskop s rozlíšením min. 1,3 Mpx pre informatívne meranie. Pre meranie s vyššou presnosťou je vhodné vybrať mikroskop s vyšším rozlíšením.

Model	Cena	Parametre
AM4013MT	13 775 Kč s DPH	<ul style="list-style-type: none"> rozlíšenie 1,3 Mpx zväčšenie 20x - 50x, nablízko až 200x USB 2.0 CMOS senzor hliníkový kryt
AM7013MT	18 966 Kč s DPH	<ul style="list-style-type: none"> rozlíšenie 5 Mpx zväčšenie 20x - 50x, nablízko až 200x USB 2.0 CMOS senzor MicroTouch trigger hliníkový kryt

Tab. 5 Popis použitých mikroskopov [42] [43]

Z hľadiska časovej náročnosti je navrhovaná metóda výrazne úspornejšia oproti manuálnej optickej metóde. Pri manuálnej optickej metóde závisí výsledný čas od zručnosti pozorovateľa a rýchlosti správneho nastavenia mikroskopu a vyhotovenia

snímky. V ďalších dvoch metódach je čas závislý viac na výpočtových a mechanických kapacitách zariadení. Časová náročnosť metód odmeraná počas vyhodnocovania metód je zobrazená v tab. 6. V tomto čase je zahrnuté vyhotovenie snímky a nie je zahrnutá príprava súčasti na meranie. V prípade metódy CMM šlo o vymontovanie pastorka z aktuátora a pripevnenie na podložku. Celkový čas procesu prípravy súčasti bol teda niekoľkonásobne dlhší než samotné meranie. Súčasť sa zároveň stala ďalej nepoužiteľnou.

Metóda	Čas
CMM	3-5 min
Manuálna optická metóda	25 min
Navrhovaná automatizovaná metóda	3 min

Tab. 6 Odhad časovej náročnosti metód

Vzhľadom k požiadavke na použitie bezkontaktnéj metódy, ktorá bude pre koncového užívateľa finančne a časovo prijateľná, je využitie digitálneho mikroskopu a následného spracovania obrazu vhodným riešením. Nedosahuje síce presnosť CMM kontaktnéj metódy, umožňuje však analyzovať tvarovo zložité prvky bez nutnosti kontaktu s meracím prístrojom. Užívateľ teda nie je limitovaný dostupnosťou prvku v rámci sústavy a krehkosťou prvku, pokiaľ dokáže prvok zosnímať za dostatočných podmienok.

11 ZÁVER

Cieľom práce bolo navrhnúť riešenie pre meranie opotrebenia pastorka REA aktuátora používaného pri regulácii obtokového ventilu turbodúchadiel spaľovacích motorov. Tomu predchádzalo popísanie princípu činnosti obtokového ventilu a akčných členov. Kľúčovým prvkom bolo pochopenie a popísanie ozubenia a jeho zmien v horizonte životnosti. Na to nadväzoval výber vhodnej metódy podľa znalostí procesu opotrebenia pastorka a požiadaviek na proces merania. Bola vybraná optická metóda využívajúca digitálny mikroskop na vyhotovenie snímky. Pre porovnanie vplyvu rozlíšenia na presnosť merania boli vybrané dve rozlíšenia digitálneho mikroskopu. Následne boli stanovené optimálne podmienky pre snímanie obrazu a bolo zvolené vhodné prostredie pre spracovanie zosnímaného obrazu.

Prvým krokom spracovania snímky bolo upravenie zosnímaného farebného obrazu. Pre meranie vzdialenosti bodov na profilovej krivke ozubenia bolo potrebné odstrániť vplyvy pozadia v obrázku a zvýrazniť profilovú krivku ozubenia, t. j. hranu objektu. Následne bola vybraná metóda pre vykreslenie stredu pastorka na základe znalosti geometrie ozubených kolies. Posledným krokom bolo určenie priesečníkov a výpočet šírky zubov a medzier. V tomto kroku sa preukázala využiteľnosť maticovej knižnice MATLABu. Pre meranie bolo vytvorené jednoduché užívateľské rozhranie.

Navrhovaná metóda bola porovnaná s manuálnou metódou merania a metódou CMM, ktorá bola kvôli predpokladanej najvyššej presnosti použitá ako referenčná metóda. Pomocou navrhovanej metódy sa podarilo dosiahnuť uspokojivé výsledky. Metóda síce nedosiahla presnosť súradnicových strojov, zmenšila ale niekoľkonásobne odchýlku oproti manuálnemu meraniu. Zároveň poskytuje pozorovateľovi možnosť merať súčasti bezkontaktné pričom jediný vyžadovaný prístup k súčasti je vizuálny. Priaznivým faktorom je tiež relatívne nízka cena mikroskopu.

Metóda poskytuje priestor pre vylepšenie. Jednou z možností je využitie iného senzora na snímanie obrazu pastorka. Na trhu sa nachádzajú rôzne značky a druhy digitálnych mikroskopov, rovnako aj úplne odlišné technológie. Následne je potrebné prispôbiť návrh softvérového riešenia metóde snímania obrazu. Ďalšou možnosťou je nahradiť konštanty vo výpočte zodpovedajúcimi parametrami a rozšíriť tak využitie metódy pre ďalšie aplikácie merania ozubených kolies. Zároveň je možné podrobne zanalyzovať kód a popísať všetky mechanizmy čo najpodrobnejšie, čo by mohlo umožniť presnejšie stanovenie neistôt a vyladenie kódu.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] Wastegate. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-02-13].
Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wastegate>
- [2] How It Works: Wastegates Explained. *Diesel Army* [online]. Murrieta, California, 2018 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.dieselmurrieta.com/engine-tech/how-it-works/how-it-works-wastegates-explained/>
- [3] AZZOPARDI, Jean Paul a Mario FARRUGIA. Measurement of knock and its analysis on turbocharged 600cc formula SAE boost pressure control and sensor signal conditioning. In: *17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*. Prague, Czech Republic, 2016.
- [4] How Does a Wastegate Work? Everything You Need to Know About Wastegate Turbochargers. *SIDE CAR* [online]. [cit. 2020-02-17].
Dostupné z: <https://www.side.cr/how-does-a-wastegate-work-everything-you-need-to-know-about-wastegate-turbochargers/>
- [5] Garrett Small Wastegate Turbos. *Garrett Advancing Motion* [online]. 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.garrettmotion.com/turbocharger-technology/how-a-turbo-works/broadest-turbo-range/small-wastegate-turbos/>
- [6] Why do some turbos have wastegates?. *BTN turbo limited* [online]. 2020 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <http://www.bnturbopartner.com/turboinfo/?id=3>
- [7] Common turbo failure – REA/SREA. *Melett* [online]. Barnsley, United Kingdom, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.melett.com/technical/why-turbos-fail/common-turbo-failures/reasrea/>
- [8] SHIGLEY, Joseph E., J. Keith NISBETT a Richard G. BUDYNAS. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 8th. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2006. ISBN 978-00-731-2193-2.
- [9] JELASKA, Damir. *Gears and gear drives*. Chichester: Wiley, 2012. ISBN 978-111-9941-309.
- [10] ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka 1*. 12. přepr.vyd. Praha: SNTL, 1968.
- [11] ZAHRADNICEK, Rudolf, Karol SEMRÁD, Romana DOBÁKOVÁ a Jozef ČERNÁN. 9. Prevody. *MATERIÁLY A KOMPONENTY, Študijný modul 6, Učebné texty podľa predpisu JAR-66* [online]. Technická univerzita v Košiciach, 2015 [cit. 2020-04-29].
Dostupné z: <http://web.tuke.sk/lf-kltp/Ucitelia/Zahradnicek%20Rudolf/%20Avio%20-%20casti%20strojov%20+%20materialy/Skript%20pre%20Patr%2066%20modul%206%20-%20PDF/09-Prevody.pdf>

-
- [12] SACHS, P. E. Neville. *Practical Plant Failure Analysis: A Guide to Understanding Machinery Deterioration and Improving Equipment Reliability* [online]. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2019 [cit. 2020-05-29]. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429451041>. ISBN 9780429451041.
- [13] NEVILLE W. SACHS, P.E. Gears – and How Their World is Changing. In: *C&S Companies* [online]. 2014 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <http://www.cscos.com/wp-content/uploads/Mechanical-NY1620-Gears-and-How-Their-World-is-Changing-Neville-Sachs.pdf>
- [14] ŽMINDÁK, Milan. *Tribotechnika: Kontaktu telies sa nevyhneme* [online]. Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, c2008-2020 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-1-2009/kontaktu-telies-sa-nevyhneme.html>
- [15] FAURE, Louis. Classification of Types of Gear Tooth Wear - Part I. *AGMA document 88 FTM 4 and Europower Transmission* [online]. Cambrai. France, 1991 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.geartechnology.com/articles/1192/Classification_of_Types_of_Gear_Tooth_Wear_-_Part_I/
- [16] KUHNELL, Bruce T. Wear in Rolling Element Bearings and Gears - How Age and Contamination Affect Them. In: *Machinery Lubrication* [online]. Noria Corporation, 2004 [cit. 2020-05-30].
- [17] NILESH, Pancholi. *GEAR DESIGN* [online]. In: . [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://nebula.wsimg.com/0d364d30f910189adc65534a25acdfc1?AccessKeyId=5C58D816F9DF2D120012&disposition=0&alloworigin=1>
- [18] *Bezkontaktní měřicí metody v experimentální mechanice* [online]. Praha: Katedra fyziky Fakulta stavební ČVUT, 2009 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k102/doktorske-studium/bezkontaktni-merici-metody-v-experimentalni-mechanice?prezentace>
- [19] MAYINGER, Franz a Oliver FELDMANN. *Optical Measurements: Techniques and Applications*. Second corrected and revised Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. DOI: 10.1007/978-3-642-56443-7. ISBN 978-3-642-63079-8.
- [20] LEACH, Richard. *Optical Measurement of Surface Topography*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-12011-4.
- [21] *Interferometry explained: Laser interferometry is a well established method for measuring distances with great accuracy*. [online]. Renishaw plc., c2001-2020 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>
- [22] MEROLI, Stefano. *Active Pixel Sensor Vs CCD. Who is the clear winner?* [online]. 2012 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: https://meroli.web.cern.ch/lecture_cmos_vs_ccd_pixel_sensor.html
- [23] What is a CMOS Image Sensor?. In: *Tokyo Electron Limited* [online]. Tokyo, c2011-2020 [cit. 2020-03-20].
-

-
- Dostupné z: <https://www.tel.com/museum/exhibition/principle/cmos.html>
- [24] *What's a Digital Microscope?* [online]. Hirox-USA, 2014 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.hirox-usa.com/WDM/>
- [25] AM4013MT-FVW. *Dino-Lite Digital Microscope* [online]. Taiwan, 2016 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: http://www.dino-lite.com/products_detail.php?index_m1_id=9&index_m2_id=35&index_id=105
- [26] PHILLIPS, Dwayne. *Image processing in C*. Lawrence, 1994. ISBN 01-310-4548-2.
- [27] *Programming in Java Advanced Imaging: Introduction to Java Advanced Imaging* [online]. Sun Microsystems, Inc., 1999 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: http://iihm.imag.fr/Docs/java/jai1_0guide/Introduction.doc.html
- [28] Python for Scientific Computing. In: *Computing in Science and Engineering* [online]. 2007, , s. 10-20 [cit. 2020-05-25]. DOI: 10.1109/MCSE.2007.58. ISSN 1521-9615. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4160250/>
- [29] What is MATLAB?. *Study.com* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://study.com/academy/lesson/what-is-matlab.html>
- [30] MALLICK, Satya. OpenCV (C++ vs Python) vs MATLAB for Computer Vision. *Learn OpenCV* [online]. 2020 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.learnopencv.com/opencv-c-vs-python-vs-matlab-for-computer-vision/>
- [31] RANJHA, Himat. Gear Measurement Using Image Processing in Matlab. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)* [online]. 2014, , 43-47 [cit. 2020-06-21]. ISSN 2278-3075. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/275335648_Gear_Measurement_Using_Image_Processing_in_Matlab
- [32] Rgb2gray. *Image Processing Toolbox User's Guide* [online]. The MathWorks Inc., c1994-2005 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://matlab.izmiran.ru/help/toolbox/images/rgb2gray.html>
- [33] GENČŮR, Martin. *Nástroj na zpracování fotografovaného textu* [online]. Brno, 2007 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/53033>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií. Ústav inteligentních systémů. Vedoucí práce Lukáš Grulich.
- [34] HLAVÁČ, Václav a Miloš SEDLÁČEK. *Zpracování signálů a obrazů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2114-9.
- [35] Regionprops: Measure properties of image regions. In: *Image Processing Toolbox User's Guide* [online]. The MathWorks Inc., c1994-2005 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <http://matlab.izmiran.ru/help/toolbox/images/regionprops.html>
- [36] *Bwboundaries: Trace region boundaries in binary image* [online]. The MathWorks, Inc., c1994-2020 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwboundaries.html>
-

-
- [37] BIRDAL, Tolga. Maximum Inscribed Circle using Distance Transform. *MATLAB Central File Exchange* [online]. MATLAB Central File Exchange, c1994-2020 [cit. 2020-05-11].
Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30805-maximum-inscribed-circle-using-distance-transform>
- [38] LEO, Liberti a Lavor CARLILE. *Euclidean distance geometry : an introduction*. Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-60792-4. ISBN 978-3-319-60791-7.
- [39] ENGWIRDA, Darren. INPOLY: A fast points-in-polygon test. *MATLAB Central File Exchange* [online]. The MathWorks Inc., c1994-2020 [cit. 2020-05-11].
Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10391-inpoly-a-fast-points-in-polygon-test>
- [40] *MATLAB® Creating Graphical User Interfaces* [online]. U.S.: The MathWorks, Inc., c2000-2015 [cit. 2020-06-17].
Dostupné z: <http://www.apmath.spbu.ru/ru/staff/smirnovmn/files/buildgui.pdf>
- [41] MATTHEWS, Stephen G. Pixel Geometry. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science 40* [online]. 2001, , 1-15 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://www.elsevier.nl/locate/entcs/volume40.html>
- [42] *Dino-Lite AM7013MT* [online]. Pozdeň, Česká republika: DREXX s.r.o. [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <https://www.dino-lite.cz/cz/am7013mt>
- [43] *Dino-Lite AM4013MT* [online]. Pozdeň, Česká republika: DREXX s.r.o. [cit. 2020-06-11]. Dostupné z: <https://www.dino-lite.cz/cz/am4013mt>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

AGMA	American Gear Manufacturers Association
CCD	Charge-Coupled Device
CMM	Coordinate Measuring Machine
CMOS	Complementary Metal–Oxide Semiconductor
DC	Direct Current
ECU	Engine Control Unit
GUIDE	Graphical User Interface Development Environment
PID	Proportional–integral–derivative
REA	Rotary Electronic Actuator
SREA	Simple Rotary Electronic Actuator
UI	User Interface

b	šírka ozubeného venca
D	priemer rozstupovej kružnice
D_a	priemer hlavovej kružnice
D_l	priemer pätnovej kružnice
$f(x,y)$	obraz v stupňoch šedej
$g(x,y)$	binárny obraz
h	výška zuba
P	hodnota prahu
p	pixel hrany objektu
Δ	odchýlka nameranej hodnoty od referenčnej hodnoty
Δ_p	priemerná odchýlka
Δ_{max}	najväčšia odchýlka

ZOZNAM PRÍLOH

Elektronické prílohy:

PRÍLOHA 1: Užívateľská aplikácia vytvorená za účelom merania pastorka

PRÍLOHA 2: Testovacie snímky pastorka použiteľné v užívateľskej aplikácii